

化工工人技术理论培训教材



流体力学基础

化学工业部人事教育司 组织编写
化学工业部教育培训中心

化学工业出版社

化工工人技术理论培训教材

流体力学基础

化学工业部人事教育司 组织编写
化学工业部教育培训中心

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

流体力学基础 / 化学工业部人事教育司, 化学工业部教育培训中心组织编写. - 北京: 化学工业出版社, 1997
化工工人技术理论培训教材
ISBN 7-5025-1899-1

I. 流… II. ①化… ②化… III. 化工过程-流体力学-理论-技术培训-教材 IV. TQ021

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 16484 号

化工工人技术理论培训教材

流 体 力 学 基 础

化学工业部人事教育司 组织编写
化学工业部教育培训中心

责任编辑:程树珍

责任校对:洪雅姝 靳 荣

封面设计:于 兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京通县京华印刷厂印刷

北京通县京华印刷厂装订

*

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 1 3/4 字数 45 千字

1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月北京第 1 次印刷

印 数:1—5000

ISBN 7-5025-1899-1/G·505

定 价:4.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

前 言

为了适应化工系统工人技术等级培训的需要,提高工人的技术理论水平和实际操作技能,我们依据《中华人民共和国工人技术等级标准》和《化工系统工人技术理论培训教学计划 and 教学大纲》的要求,组织有关人员编写了这套培训教材。

在教材编审过程中,遵循了“坚持标准,结合实际,立足现状,着眼发展,体现特点,突出技能,结构合理,内容精炼,深浅适度”的指导思想,以“等级标准”为依据,以“计划和大纲”为蓝图,从有利于教师教学和方便工人自学出发,力求教材内容能适应化工生产技术和现代化生产工人培训的要求。

按照《中华人民共和国工人技术等级标准》规定的化工行业 168 个生产工种的有关内容,在编制教学计划和划定大纲时,在充分理解等级标准的基础上,吸取了国外职业教育的成功经验,对不同工种、不同等级工人围绕技能所要求掌握的技术理论知识进行分析和分解,作为理论教学的基本单位,称之为“单元”。在计划和大纲中,168 个工种按五个专业大类(及公共课)将不同等级的全部理论教学内容分解为 301 个教学单元。为了方便各单位开展培训教学活动,把教学计划中一些联系较为密切的“单元”合在一起,分成 112 册出版。合订后的全套教材包括以下六部分。

无机化工类单元教材共 25 册:《流体力学基础》、《管路的布置与计算》、《物料输送》、《气相非均一系分离》、《液相非均一系分离》、《物料混合》、《固体流态化与应用》、《加热与冷却》、《蒸发》、《结晶》、《浸取与干燥》、《制冷》、《焙烧与工业炉》、《粉碎与筛分》、《电渗析》、《吸附分离》、《离子交换》、《常见的无机化学反应》、《电解及其设备》、《物料衡算与热量衡算》、《合成氨造气》、《合成氨变换》、《合成氨净化》、《合成氨压缩》和《氨的合成》。

有机化工类单元教材共7册:《吸收》、《蒸馏》、《萃取》、《有机化学反应(一)》、《有机化学反应(二)》、《有机化学反应(三)》和《化学反应器》。

化工检修类单元教材共43册:《电镀》、《腐蚀与防护》、《机械传动及零件》、《液压传动与气动》、《金属材料热处理知识》、《机械制造工艺基础》、《化工检修常用机具》、《工程力学基础》、《测量与误差》、《公差与配合》、《化工机器与设备安装》、《化工压力容器》、《展开与放样》、《化工管路安装与维修》、《钳工操作技术》、《装配和修理》、《钢材矫正与成型》、《电工材料及工具》、《焊工操作技术》、《焊接工艺》、《阀门》、《化工用泵》、《风机》、《压缩机》、《化工分析仪表(一)》、《化工分析仪表(二)》、《化工测量仪表》、《电动单元组合仪表》、《化工自动化》、《集散系统》、《仪表维修工识图与制图》、《仪表常见故障分析与处理》、《过程分析仪表》、《化工检修钳工工艺学》、《化工检修铆工工艺学》、《化工检修管工工艺学》、《化工检修焊工工艺学》、《化工防腐橡胶衬里》、《化工防腐金属喷涂》、《化工防腐金属铅焊》、《化工防腐砖板衬里》、《化工防腐塑料》以及《化工防腐玻璃钢》。

化工分析类单元教材6册:《化学分析的一般知识及基本操作》、《化学分析》、《电化学分析》、《仪器分析》、《化验室基本知识》和《有机定量分析》。

橡胶加工类单元教材共11册:《橡胶、配合剂与胶料配方知识》、《再生胶制作机理、工艺及质量检验》、《橡胶加工基本工艺》、《轮胎制造工艺方法》、《力车胎制造工艺方法》、《胶管制造工艺方法》、《胶带制造工艺方法》、《橡胶工业制品制造工艺方法》、《胶鞋制造工艺方法》、《胶乳制品制造工艺方法》和《炭黑制造工艺方法》。

另外还有公共课及管理课类单元教材共20册:《电工常识》、《电工基础》、《电子学一般常识》、《电子技术基础》、《机械识图》、《机械制图》、《化工管路识图》、《工艺流程与装备布置图》、《工厂照明与动力线路》、《电气识图与控制》、《电机基础及维修》、《工厂电气设备》、《工厂电气技术》、《安全与防护》、《三废处理与环境保护》、《化工计量常识》、《计算机应用基础知识》、《化工应用文书写》、《标准化基础知识》和《化工生产管

理知识》。

按照“单元”体系组织编写工人培训教材,尚是一种尝试,由于我们经验不足和教材编审时间的限制,部分教材在体系的合理性、内容的先进性、知识的连贯性和深广度的准确性等方面还不尽如人意,为此建议:

一、各单位在组织教学过程中,应按不同等级的培训对象,根据相应的教学计划和教学大纲的具体要求,以“单元”为单位安排教学。

二、工人技术理论的教学应与操作技能的培训结合起来。技术理论的教学活动除应联系本单位生产实际外,还应联系培训对象的文化基础、工作经历等实际情况,制订相应的教学方案,确定相应的教学内容,以提高教学的针对性和教学效率。

三、在教学过程中发现教材中存在的问题,可及时与我们联系,也可与教材的编者或出版单位联系,使教材中的问题得到及时更正,以利教学。

本套教材的组织编写,得到全国化工职工教育战线各方面同志的积极支持和帮助,在此谨向他们表示感谢。

化学工业部人事教育司

化学工业部教育培训中心

1996年3月

内 容 提 要

本书为化工工人技术理论培训教材之一,内容包括:化工过程中流体的基本规律和单位制、流体静力学、流体动力学、流体阻力的计算等内容。

本书可供化工操作工人和检修工人学习使用。

目 录

流体力学基础(无 001)	1
第一章 化工过程中流体的基本规律和单位制	2
第一节 化工过程中流体的基本规律	2
第二节 单位制	5
第二章 流体静力学	8
第一节 流体的基本性质	8
第二节 流体静力学	14
第三章 流体动力学	23
第一节 稳定流动与不稳定流动	23
第二节 稳定流动下的物料衡算	24
第三节 稳定流动下的能量衡算	25
第四节 柏努利方程式的应用	29
第四章 流体阻力的计算	35
第一节 流体阻力产生的原因	35
第二节 流体的流动类型	36
第三节 流体在圆管中的速度分布	38
第四节 流体阻力的计算	39

流体力学基础

(无 001)

上海天原(集团)有限公司 白素荣 编

第一章 化工过程中流体的基本规律和单位制

不同化工生产过程中的同一种化工单元操作,它们所遵循的原理相同,所用的设备相似。在学习过程中,如果能从这些共同的规律着手,去掌握和认识各个过程的共同特性,将会有助于加深对这个过程的理解,掌握各个过程的有关理论。

第一节 化工过程中流体的基本规律

一、物料平衡

根据物质守恒定律,在一个稳定的生产过程中,所投的物料量,应与所得产品量及过程损失量之和相等。即

输入的物料量=输出的物料量+物料的损失量

按照这一规律进行的计算,称为物料衡算。物料衡算的计算式在化工生产中起着十分重要的作用。

【例 1-1】 如图 1-1 所示的氯化氢合成塔中,已知每小时进入的氢气量为 20kg,氯气量为 710kg,实际测定出氯化氢的产率为 98%,试求该合成塔每小时的产量和损失量。

解: 根据产率 = $\frac{\text{实际产量}}{\text{理论产量}}$ 的概念,在产率已知的情况下,只要知道理论产量就可以算出实际产量,因此首先应计算塔的理论产量。

已知氯化氢的反应式为 $\text{H}_2 + \text{Cl}_2 = 2\text{HCl}$

各组分之间的反应式为

2	71	73
20	710	730

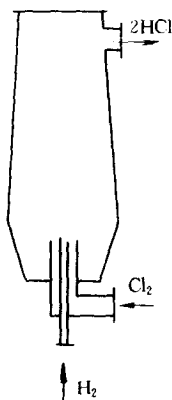


图 1-1 例 1-1 附图

即理论上 HCl 的产量为 730kg/h, 实际产量为 $730 \times 98\% = 715.4$ kg/h。

则 物料损失 = $730 - 715.4 = 14.6$ kg/h

其结果符合物料衡算式

输入物料量 = 输出物料量 + 物料损失量

$$20 + 710 = 715.4 + 14.6$$

上述计算说明通过物料衡算了解合成塔的实际生产能力。

必须指出, 任何过程总是有损耗的。损耗越小, 说明操作越完善, 经济效益越高, 否则说明生产状况不正常, 应该找出原因加以改正。

此外, 在本课程中所提到的重要内容, 如流体的连续性方程, 各种单元操作的生产能力的计算等, 都是以物料衡算为基础而导出的。

二、热量平衡

所谓热量衡算, 就是根据能量守恒定律, 对一个稳定的生产过程进行热量平衡计算。即

输入的能量 = 输出的能量 + 能量损失

热量衡算在化工生产中, 可以帮助我们选择最佳的生产条件, 检验热量的消耗程度, 制定既经济又合理的热量消耗方案, 确定热能综合利用的途径。在进行热量衡算的过程中, 除应确定其衡算范围外, 还要注意其基准温度, 一般都以有关资料所采用的基准温度为准。

【例 1-2】 设在一列管式换热器中, 用压强为 0.715 kg/cm^2 的饱和水蒸汽来加热空气。蒸汽的流量为 0.01 kg/s 空气的流量为 1 kg/s , 冷凝液在饱和温度下排出。若在该温度范围内, 空气的平均比热容为 $1.01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 空气的进口温度为 20°C , 试计算空气的出口温度(忽略热损失)。

解: 设该换热器为稳定传热, 并以 1 s 为计算基准。

① 输入的热量 Q_{λ} —— 由水蒸汽输入的热量, 水蒸汽量为 $W_{\text{汽}}$
 $Q_{\lambda} = W_{\text{汽}} \gamma$

已知, $W_{\text{汽}} = 0.01 \text{ kg/s}$, 且根据其 $p = 0.715 \text{ kg/cm}^2$ 查得汽化潜热 $\gamma = 2279 \text{ kJ/kg}$

所以

$$Q_{\lambda} = 0.01 \times 2279 = 22.79 \text{ kJ/s}$$

② 输出的热量 $Q_{\text{出}}$ —— 空气获得的热量

$$Q_{\text{出}} = W_{\text{空气}} C_{\text{空气}} (t_2 - t_1)$$

已知

$$C_{\text{空气}} = 1.01 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$W_{\text{空气}} = 1 \text{ kg/s}$$

$$t_1 = 20^\circ\text{C} = (20 + 273) \text{ K} = 293 \text{ K}$$

所以

$$Q_{\text{出}} = 1 \times 1.01 \times (t_2 - 293)$$

③ 建立热平衡方程式

$$Q_{\text{入}} = Q_{\text{出}} + Q_{\text{损}}$$

因为

$$Q_{\text{损}} = 0$$

所以

$$Q_{\text{入}} = Q_{\text{出}}$$

即

$$22.79 = 1 \times 1.01 \times (t_2 - 293)$$

故

$$t_2 = \frac{22.79}{1.01} + 293 = 315.6 \text{ K} (\text{即 } 42.56^\circ\text{C})$$

因此, 空气的出口温度为 42.56°C

三、平衡关系

任何过程都是变化着的, 在一定条件下由不平衡到平衡, 平衡状态是过程变化的极限。以食盐溶解为例, 在一定的温度和一定量的溶剂中, 所投入的食盐在溶液中溶解, 直至达到饱和溶液为止。这时, 从溶解与结晶这两个单一的过程来看, 过程并没有终止, 两者处于动平衡状态, 溶液的浓度不再增加。当冷热流体最终的温度相等时, 两种流体之间的传热过程也就不再进行。当吸收剂中所含气体的浓度达到在一定条件下的溶解度时, 宏观的吸收过程便不再进行了。这些都说明, 一个过程在一定条件下能否进行, 以及进行到什么程度, 只有通过平衡关系来判断, 平衡关系是本学科所讨论的许多过程的基本规律之一。

四、过程速率

平衡关系只说明过程的方向和极限, 而过程进行的快慢在工程上是比平衡关系更为重要的问题。把单位时间里各种过程进行的变化量称为过程的速率。显然, 过程的速率越高, 设备的生产能力则越大, 在同样产量的情况下, 设备的尺寸就可以越小。过程的速率可以用如下的基本关系表示:

$$\text{过程的速率} = \frac{\text{过程的推动力}}{\text{过程的阻力}}$$

过程的推动力是过程在某一瞬间状态的因素距离平衡状态因素的差额。在流体流动过程中，它表现为压强差；在传热过程中它是冷热流体的温度差；在传质过程中，它是物质的浓度差。构成过程阻力的因素很多，而且因过程的性质不同而不同。从这一基本的关系式中可以看出，提高过程速率的途径在于加大过程的推动力和减少过程的阻力，这将在学习本课程中应该引起注意的一个重要概念。

第二节 单位制

进行化工计算之前，要注意所使用的公式对各物理量的单位制要求统一。

1. 几种常见的单位制

(1) 绝对单位制 以长度(单位为厘米，代号为 cm)，质量(单位为克，代号为 g)，时间(单位为秒，代号为 s)为基本量，由于厘米和克的量太小，故有时以米(代号为 m， $1\text{m} = 10^2\text{cm}$)，公斤(代号为 kg， $1\text{kg} = 10^3\text{g}$)和秒为基本单位。以 m、kg、s 为基本量的单位制又称 MKS 制，绝对单位制在一些早期的物化手册中被广泛采用，所以又称之为物理单位制。

(2) 工程单位制 以长度(单位为米)、力(单位为千克(力)、时间(单位为秒)为基本量。它是各种单位制中唯一不用质量，而把力作为基本量的制度，质量作为导出量。

(3) 国际单位制 由于同一个物理量在不同的单位制中具有不同的单位和数值，这给计算和交流带来麻烦，运算时容易引起错误。为了改变这种情况，使一个物理量只有一个单位，1960 年 10 月第十一届国际计量大会通过了国际上通用的单位制——国际单位制，代号 SI。

SI 是在 MKS 制基础上建立起来的，共制定了七个基本单位，见表 1-1。

表 1-1 SI 的七个基本单位

基本物理量	单位	代号	基本物理量	单位	代号
长度	米	m	物质的量	摩尔	mol
质量	千克(公斤)	kg	电流强度	安培	A
时间	秒	s	发光强度	坎德拉	cd
温度	开尔文	K			

在本教材中,一般只用 m、kg、s、K 和 mol 这五个基本单位。

使用国际单位制有两个突出的优点,一是具有通用性,在自然科学、工程技术甚至经济领域里的一切物理量的单位都可以由上述七个基本单位导出;二是具有一贯性,在 SI 中任何一个导出单位由上述七个基本单位相乘或相除而导出时,都不需引入比例常数。每种物理量只有一个单位。例如:热、功、能是本质相同的物理量(能量),但在工程单位制中热的单位是 kcal,功的单位是 $\text{kgf} \cdot \text{m}$,在运算中,必须通过所谓“热功当量”(1kcal=427kgf·m=4.187kJ)这个比例常数来换算,在 SI 中,热、功、能三者都用(J)为单位,换算时不用比例常数,使运算简便且不易出错误。

2. 单位换算

在进行化工计算之前,要注意所使用的公式对各物理量单位的要求,一个物理量公式应采用同一种单位制。不符合的则应将各物理量在代入公式之前,事先换算成适合公式要求的单位。

物理量由一种单位换算成另一种单位时,虽然量本身没有变化,但数值是要改变的。换算时要将原单位的数目乘以两单位间的换算因数才能得到新单位的数值。

换算因数就是两单位之间换算的倍数关系。

例如 $1\text{kg}=1000\text{g}$

则“1000”即为 kg 换算成 g 的换算因数。

又如 $1\text{atm}=760\text{mm 汞柱}=101.3 \times 10^3\text{Pa}$

则“760”即为 atm 换算成 mm 汞柱的换算因数。而“ 101.3×10^3 ”即为 atm 换算成 Pa 的换算因数。

单位换算在化工计算中非常重要,如果在运算中不加注意,则会发

生错误。

【例 1-3】 已知某锅炉的压强为 12kgf/cm^2 , 试计算此压强相当于多少 Pa?

解: 因为 $1\text{kgf/cm}^2 = 9.81 \times 10^4 \text{Pa}$
因此锅炉的压强

$$P = 12 \times 9.81 \times 10^4 = 1.18 \times 10^6 \text{Pa}$$

【例 1-4】 已知某机车做了 $2 \times 10^5 \text{kg} \cdot \text{m}$ 的功, 问相当于多少 J 功?

解: 因为 $1\text{kgf} \cdot \text{m} = 9.81 \text{J}$
因此 $A = 2 \times 10^5 \times 9.81 = 1.96 \times 10^6 \text{J}$
即相当于 $1.96 \times 10^6 \text{J}$ 功。

习 题

1. 已知 1 标准大气压 $= 1.033\text{kg/cm}^2$, 试问 5 标准大气压等于多少 Pa。
2. 一个发动机作了 36000 千克·米的功, 问它相当于多少 kJ?
3. 假定某房间的暖气片, 每小时向空气中传出 840kJ 的热量, 试换算成工程单位表示的量。
4. 一台起重机将质量为 10^3 千克的物体升高了 4 米, 问钢丝绳对物体做了多少千焦耳(kJ)的功?
5. 一段蒸汽管, 每小时向空气中散失热量 1400 千卡, 试换算成 SI 表示的量。
6. 质量为 30kg 的物体从某一高度自由下落, 4 秒后到达地面, 假定空气对物体的阻力为零, 试求重力对物体做的功为多少 J?

第二章 流体静力学

流体静力学的任务是研究流体在静止状态下流体内部压力的变化规律。因此,首先要了解流体的一些重要物理性质。

第一节 流体的基本性质

化工生产中常遇到的流体,除了水、油、蒸气和空气外,还有酸、碱等液体。这些流体虽然性质各不相同,但它们在流动过程中遵循共同的规律,而这一规律又与流体本身的性质有关。从生活经验中知道,流体越粘,就越难流动;流体越“重”运送时要花费的力也越多等。这里将首先介绍流体与流动有关的一些基本性质。

一、流体的密度和相对密度

1. 密度 流体的密度是指单位体积的流体所具有的质量,以符号 ρ 表示。

若以 m 表示流体具有的质量,kg; V 表示流体具有的体积, m^3 。

则

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ kg/m}^3$$

如体积为 $1m^3$ 、温度为 4°C 的纯水质量是 1000kg ,所以 4°C 纯水的密度 $\rho_{4^\circ\text{C}} = 1000\text{kg/m}^3$ 。其他流体的密度一般可在物理化学手册或有关资料中查得。

液体的密度随着温度和压强的变化而变化。温度升高,流体的体积增大,密度则变小。

如: 4°C 水的密度为 1000kg/m^3 ;

20°C 水的密度为 998.2kg/m^3 ;

100°C 水的密度为 958.4kg/m^3 。

查用密度数据时,应注意流体相应的温度。压强对液体密度的影响较小。例如 10°C 水,压强每增加 1atm ,其体积只减少了原有体积的

$\frac{1}{30000}$, 因此常常把液体称为不可压缩流体。

气体是可压缩性流体, 气体的密度随着温度和压强有较大的变化。因此气体的密度必须标明其状态, 工业上通常用标准状况下(即气体的温度为 0°C , 压强为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$), 1m^3 体积的气体所具有的质量表示该气体的密度, 如空气在 0°C 和 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 下, 1m^3 空气的质量为 1.29kg , 则该空气的密度为 $1.29\text{kg}/\text{m}^3$ 。从手册中查得的气体密度大多都是指标准状态下气体的密度, 如果需要知道在实际操作条件下气体的密度, 那么当气体压强不太高、温度不太低的情况下, 可以近似地用理想气体状态方程计算:

$$PV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

$$\text{所以} \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT} (\text{kg}/\text{m}^3) \quad (2-1)$$

式中 m —— 气体的质量, kg ;

V —— 气体的体积, m^3 ;

P —— 气体的压强, kPa ;

M —— 气体的摩尔质量, kg/kmol ;

R —— 通用气体常数, $R = 8.314 \text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

T —— 气体的绝对温度, K ; ($1\text{K} = 273 + t^{\circ}\text{C}$)。

2. 流体的相对密度 在工业生产中还常常用到相对密度的概念, 它是指流体密度与 4°C 纯水的密度的比值, 用符号 d 表示, 即

$$d = \frac{\rho}{\rho_{4^{\circ}\text{C}}} \quad (2-2)$$

因为 4°C 纯水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$, 因此流体的密度可用下式计算, 即

$$\rho = 1000d \text{kg}/\text{m}^3 \quad (2-3)$$

应当注意: 相对密度是两种流体密度的比值, 所以相对密度是没有单位的。

工业上常用测定流体相对密度的方法来确定流体的密度。其做法是将比重计放在待测密度的液体中测出其液体的相对密度, 然后计算